第39卷 第6期
2022年11月

干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH

Vol. 39 No. 6
Nov. 2022

1994—2018年哈萨克斯坦首都圈植被NPP时空变化特征及驱动因素

陈玉森[1,2,3]， 艾柯代·艾斯凯尔[1,2,3]， 王永东[1,2,3]， Talgat ABZHANOV[4]，
Dani SARSEKOVA[4]， Zhazira ZHUMABEKOVA[4]

（1. 中国科学院新疆生态与地理研究所，新疆 乌鲁木齐 830011；2. 中国科学院大学，北京 100049；
3. 国家荒漠-绿洲生态建设工程技术研究中心，新疆 乌鲁木齐 830011；
4. 哈萨克斯坦赛福林农业技术大学，阿斯塔纳 010000）

摘 要： 厘清气候变化和人类活动对植被净初级生产力（NPP）的影响，对区域生态系统变化与可持续发展具有重要意义。基于CASA模型，利用1994—2018年5期Landsat遥感影像及气象数据，通过仿真情景实验研究了人类活动和气候变化对哈萨克斯坦首都圈植被净生产力的影响。结果表明：（1）1994—2018年间，哈萨克斯坦首都圈植被NPP呈波动上升趋势，NPP多年均值为226.21 g C·m^{-2}·a^{-1}；（2）首都圈人工造林面积不断增加，对NPP有显著的正增益效果（0.38 Tg C·a^{-1}, $P<0.01$），而气候变化对NPP影响波动比较大，整体上呈现负增益效果（−0.07 Tg C·a^{-1}, $P=0.34$）；在土地覆盖变化和气候变化共同作用下，哈萨克斯坦首都圈植被NPP总体上呈显著正增益效果（0.27 Tg C·a^{-1}, $P<0.1$）。相较于气候变化，人类活动对植被净初级生产力影响更加明显，相关性也更强；（3）气候因子中温度、太阳辐射和降水是影响NPP的主要因素。1994—2000年和2006—2012年期间由于温度的升高和降雨量的减少导致NPP损失，分别由218.50 g C·m^{-2}·a^{-1}、201.19 g C·m^{-2}·a^{-1}降到189.00 g C·m^{-2}·a^{-1}、188.48 g C·m^{-2}·a^{-1}；2000—2006年和2012—2018年期间随着降水条件的改善，该地区NPP均值显著上升，均值分别达到201.19 g C·m^{-2}·a^{-1}、207.73 g C·m^{-2}·a^{-1}。本文研究结果有助于揭示气候变化和人类活动对植被NPP的影响机制，可为改善荒漠草原区生态环境质量，缓解全球变暖问题和实现哈萨克斯坦2060年碳中和目标提供参考。

关键词： CASA模型；NPP；哈萨克斯坦首都圈；PCA分析；仿真实验设计

植被净初级生产力（Net Primary Productivity，NPP）是指植物在单位时间、单位面积内所积累的有机物的量，是由植物光合作用所产生的有机质总量（Gross Primary Productivity，GPP）中减去自养呼吸后的剩余部分，也称为净第一生产力[1-3]。NPP被认为是生态系统过程的调节器和陆地碳汇的主要决定因素[4]，而陆地生态系统是目前全球碳循环的主要汇，潜在地抵消大量人为碳排放[5]。因此，NPP不仅直接反映植物群落在自然环境条件下的生产能力，表征陆地生态系统的质量状况，而且是测算土地覆盖及能源消费碳排放，判定生态系统碳源、汇以及调节生态过程的主要因子[6]，在全球变化及碳平衡中起着至关重要的作用[7-8]。

由于地面测量数据无法描述NPP在较大区域范围内的时空分布特征，所以使用多源遥感数据和数学模型来模拟计算NPP就变成了一种很常用的重要方法[9]。相比于传统的生态学过程模型和气候生产力模型涉及参数多且复杂度高和偏差较大的缺点，光能利用率模型数据获取难度较小同时模型模拟精度较高，还可以通过遥感手段辅助计算，节省了大量繁琐的野外试验测定步骤，成为了NPP估算中的主要研究方法[10-13]。其中，CASA模型利用归一化植被指数（NDVI）和土地覆盖分类2种遥感数据，以及结合月平均温度、太阳辐射、降水、蒸散量等气

收稿日期： 2022-03-27； **修订日期：** 2022-09-14
基金项目： 中国科学院战略性先导科技专项（A类）（XDA20030102）；中国科学院关键技术人才项目（“一带一路”荒漠化防治技术模式研究）
作者简介： 陈玉森（1998-），男，在读硕士研究生，研究方向为荒漠化防治. E-mail: chenyusen20@mails.ucas.ac.cn
通讯作者： 王永东. E-mail: wangyd@ms.xjb.ac.cn

象数据对NPP进行估算,在减少复杂参数收集的同时也可以更加精确地完成大范围的NPP模拟[14-17],在国内外被广泛应用于不同区域各种地表植被类型固碳量的反演模拟[12]。

哈萨克斯坦首都阿斯塔纳地处中亚干旱-半干旱气候带[18-19],是世界上第二冷的首都城市,且大风、沙尘暴及暴风雪频发,生态系统极为脆弱[20-22]。因此,研究哈萨克斯坦首都圈植被NPP时空变化,探究气候变化与人类活动影响下的驱动因素,厘定气候因素中的主导因子,评估气候变化与人类活动对亚寒带草原生态系统NPP的影响,对于区域生态系统的可持续管理起着至关重要的作用。

1 研究区概况

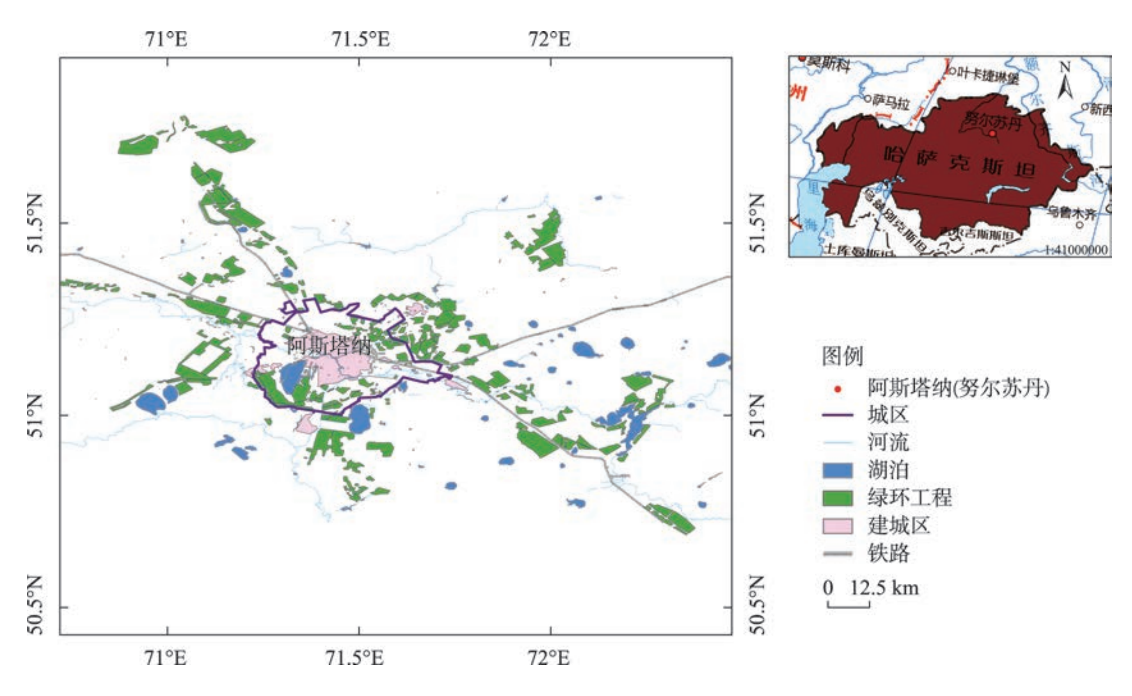
哈萨克斯坦首都阿斯塔纳(努尔苏丹,51.00°~51.30°N,71.22°~71.74°E,图1)位于辽阔的哈萨克大草原中北部,属于典型温带大陆性气候区。年平均气温3 ℃,平均海拔374 m,多年平均降水量290 mm。冬季寒冷漫长,暴风雪严重,夏季短热潮湿。自1997年迁都至今,首都圈人口、经济以及城区建设得到了飞速发展,如今阿斯塔纳已经成为仅次于前首都阿拉木图的哈萨克斯坦第二大城市[20]。

2 数据与方法

2.1 数据来源

本文由GEE(Google Earth Engine)平台获取CASA模型所用到的有归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index,NDVI)、土地覆盖类型数据和温度、太阳辐射量、实际蒸散量、潜在蒸散量等[23]。其中,NDVI是对Landsat数据再次去云处理并进行波段运算得到,空间分辨率为30 m。土地覆盖类型数据是基于1994—2018年的Landsat影像,参考全球30 m土地覆盖数据(GlobeLand 30)的分类标准及制图规范,建立了哈萨克斯坦首都圈土地覆盖分类系统。在此基础上,利用随机森林、目视解译相结合的方法,对哈萨克斯坦首都阿斯塔纳周边区域的土地覆盖类型进行遥感分类,经过严格的修改和精度验证,得到较为精确的土地覆盖分类数据。

Terra Climate数据来自爱达荷大学发布的全球陆地表面月均气候和气候水平衡数据集,涵盖了全球气候水平衡和陆地表面每月气候数据。包括太阳辐射、潜在蒸散量、实际蒸散量等气温数据。采用MODIS数据集中的月平均温度数据以及NPP产



注:底图采用自然资源部标准地图制作,审图号为GS(2021)5453号,对底图边界无修改。下同。

图1 阿斯塔纳及周边地区主要土地覆盖类型

Fig. 1 Main land cover types in and around Astana

品,其中NPP产品用于对CASA模型模拟结果进行精度验证。利用GEE云平台下载上述气象数据进行重投影裁剪操作,用于CASA模型的计算。

2.2 研究方法

在CASA模型中,植被吸收的有效光合辐射以及在进行光合作用过程中实际的光能利用效率直接决定了该模型对NPP的模拟计算结果。本文利用朱文泉等[24]在干旱区生态研究中已经得到应用和验证的研究成果,配置CASA模型最大光能利用率等参数。

CASA模型中的NPP主要由植物的光合有效辐射(APAR)和实际光能利用率(ε)2个因子来控制,计算公式如下:

$$\mathrm{NPP}(x,t)=\mathrm{APAR}(x,t)\times\varepsilon(x,t) \tag{1}$$

植被光合作用过程中吸收的有效光和辐射(APAR)取决于太阳总辐射量以及植被对有效光合辐射的吸收比例,计算公式如下

$$\mathrm{APAR}(x,t)=\mathrm{SOL}(x,t)\times\mathrm{FPAR}(x,t)\times0.5 \tag{2}$$

式中:APAR(x,t)表示某像元x在t月吸收的光合有效辐射(g C·m^{-2}·月$^{-1}$);$\varepsilon(x,t)$表示某像元x在t月的实际光能利用率(g C·MJ^{-1}),本文参考朱文泉等[10]研究成果,确定了不同植被类型最大光能利用率(表1)。SOL(x,t)表示t月在像元x处的太阳总辐射量(g C·m^{-2}·月$^{-1}$);FPAR(x,t)表示植被层对于入射有效光合辐射的吸收比例;常数0.5表示植被进行光合作用过程中所能利用的太阳光有效辐射波段范围(波长为0.4~0.7 μm)占太阳总辐射量的比例。

表1　不同植被类型最大光能利用率

Tab. 1　Maximum light energy utilization rate of different vegetation types

编号	植被类型	ε模拟值
1	落叶针叶林	0.485
2	常绿针叶林	0.389
3	落叶阔叶林	0.692
4	常绿阔叶林	0.985
5	针阔混交林	0.475
6	常绿、落叶阔叶混交林	0.768
7	灌丛	0.429
8	草地	0.542
9	耕地	0.542
10	其他	0.542

环境因子如大气温度、土壤含水量等通过影响植物的光合能力,即光能利用率$\varepsilon(x,t)$来调节植被的NPP[25]。

$$\varepsilon(x,t)=T_{\varepsilon1(x,t)}\times T_{\varepsilon2(x,t)}\times W_{\varepsilon(x,t)}\times\varepsilon_{\max} \tag{3}$$

$$T_{\varepsilon1(x,t)}=0.8+0.02\times T_{\mathrm{opt}(x)}-0.0005\times\left[T_{\mathrm{opt}(x)}\right]^2 \tag{4}$$

$$T_{\varepsilon2(x,t)}=\frac{1.184}{\left\{1+\exp\left[0.2\times T_{\mathrm{opt}(x)}-10-T_{(x,t)}\right]\right\}}\times\frac{1}{\left\{1+\exp\left[0.3\times(-T_{\mathrm{opt}(x)})-10-T_{(x,t)}\right]\right\}} \tag{5}$$

$$W_{\varepsilon(x,t)}=0.5+0.5\times\mathrm{EET}_{(x,t)}/\mathrm{EPT}_{(x,t)} \tag{6}$$

式中:$T_{\varepsilon1(x,t)}$和$T_{\varepsilon2(x,t)}$表示低温情况和高温情况对光能利用率的胁迫作用;$W_{\varepsilon(x,t)}$表示水分胁迫影响系数,反映水分条件的影响;$\varepsilon_{\max}$表示理想条件下的最大光能利用率(g C·MJ^{-1});$T_{\mathrm{opt}(x)}$表示植物生长的最适温度;$T_{(x,t)}$表示月平均温度(℃);EET表示区域实际蒸散量(mm);EPT为区域潜在蒸散量(mm)[26]。

2.3 仿真实验设计

本文设计了3种仿真情景来模拟1994—2018年气候变化及人类活动引起的土地覆盖类型变化,评估其对哈萨克斯坦首都圈植被NPP的影响(表2)。情景1:按照土地覆盖类型和气候变化的实际情况,利用相应年份的土地覆盖类型和气候数据对植被NPP进行模拟计算;情景2:控制土地覆盖类型和NDVI保持在1994年的水平,研究从1994—2018年以来气候变化对植被NPP的影响;情景3:控制气候数据保持在1994年的水平,研究1994—2018年人类活动土地覆盖变化对植被NPP的影响。3种情景下对NPP的模拟均利用Python语言计算得到。

为了进一步探究温度、降水、太阳辐射、蒸散量各气候因子对植被NPP的影响,随机选取500个点

表2　不同模拟仿真情景

Tab. 2　Different simulation scenarios

仿真情景	LULC	NDVI	sol	temp	aet	pet
土地覆盖类型和气候变化	△	△	△	△	△	△
土地覆盖类型变化	△	△	○	○	○	○
气候变化	○	○	△	△	△	△

注:△表示输入量从1994—2018年的变化;○表示输入量保持不变;LULC表示土地覆盖类型;NDVI表示归一化植被指数;sol表示太阳辐射;temp表示平均温度;aet表示实际蒸散量;pet表示潜在蒸散量。

进行主成分分析和皮尔森相关系数计算，进一步研究NPP变化的气候驱动因子。

2.4 模型评价

空间异质性、时间上的不一致性以及缺乏直接测量的NPP值，如何在大范围内建模验证NPP一直是陆地生态碳积累研究中的重点[27]。MODIS在进行NPP计算的时候对很多区域进行了插值补充，在研究大范围NPP的情况下该产品具有较好的应用，但是无法满足在更精细尺度下探讨NPP的驱动因素。MOD17A3H V6产品提供了涵盖整个中亚地区500 m空间分辨率的年度净初级生产力（NPP）。因此，本文利用MODIS的NPP产品来验证CASA模型模拟整个地区NPP结果的合理性。

验证结果表明：CASA模型模拟哈萨克斯坦首都圈不同土地覆盖类型的平均NPP与MODIS数据产品一致性很好，特别是防护林和裸地（图2a），在整个哈萨克斯坦首都圈MODIS-NPP与CASA-NPP的平均值均具有较好的相似度（$P<0.001$）。模型模拟结果显示（图2b），在种植防护林的区域NPP值明显增加，最大变化值达到318.7 g C·m^{-2}，草地NPP均值变化不大，裸地和水体以及建筑区NPP值出现明显下降，最大下降300.9 g C·m^{-2}（图2b）。总体分析来看，该地区NPP保持不变的区域占比较大。基于以上验证结果，本文认为CASA模型模拟的结果是合理的且适用于此区域。

3 结果与分析

3.1 哈萨克斯坦首都圈NPP变化特征

基于CASA模型模拟的结果（表3），随着研究区土地覆盖类型的改变，防护林面积不断增加（图3a，图3b），1994—2018年首都圈植被NPP呈现先下降后增长的波动上升趋势，NPP年均值为226.21 g C·m^{-2}。其中，1994—2000年NPP均值每年下降约2.74 g C·m^{-2}·a^{-1}，从218.50 g C·m^{-2}下降至202.07 g C·m^{-2}，随后则逐年上升；2006年、2012年NPP均值分别为216.72 g C·m^{-2}与235.35 g C·m^{-2}，2018年NPP均值为258.42 g C·m^{-2}，达到该地区最大值。在1994—2018年间，首都圈内城镇建筑、水体和裸地区域NPP出现明显的损失（图3c），最高损失达到325.28 g C·m^{-2}，在其他植被和人工林区域内NPP均值显著增加，特别是人工林区域NPP平均值增加最为显著，最高达到310.18 g C·m^{-2}。

研究发现，在1994—2018年期间，首都圈防护林、草地、裸地、建筑用地及水体等不同土地覆盖类型下植被NPP均值由大到小为：防护林>其他植被>裸地>建筑用地>水体。5种土地覆盖类型NPP年均值从大到小为：防护林>草地>裸地>建筑用地>水

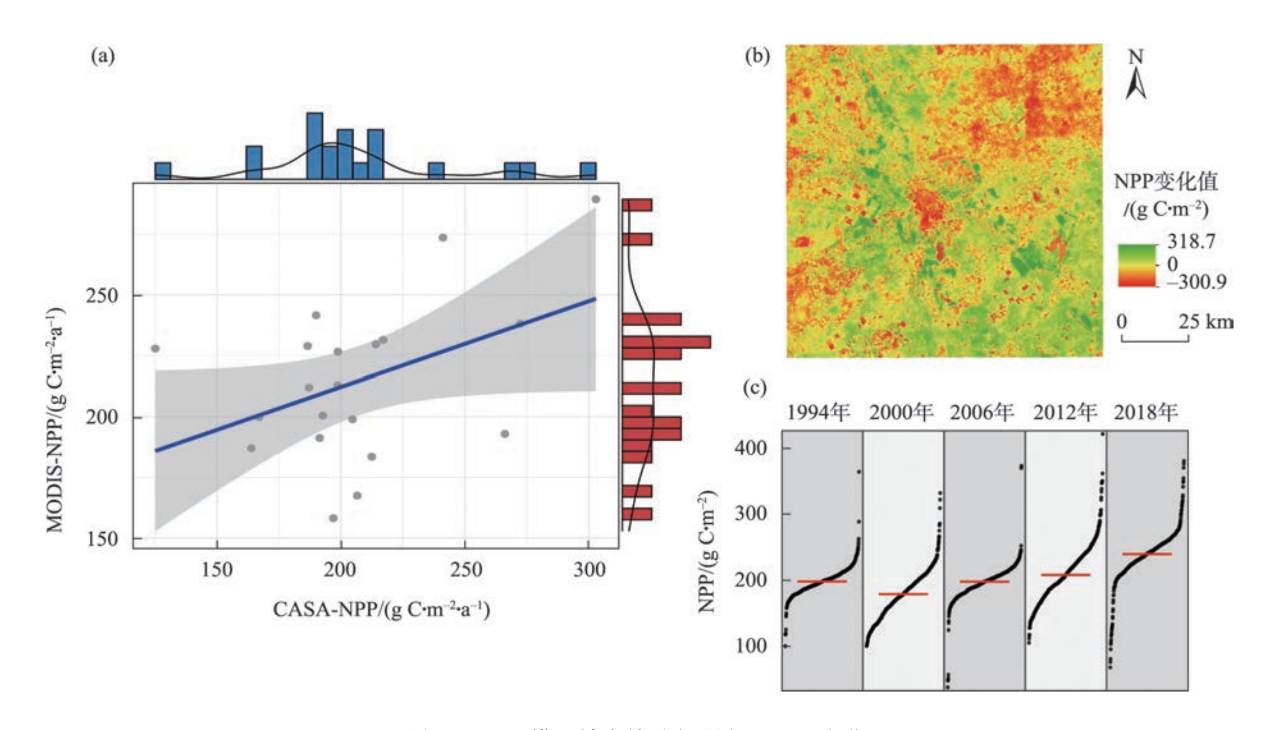


图2 CASA模型精度检验与研究区NPP变化

Fig. 2 CASA model simulation NPP accuracy verification

表3 各土地覆盖类型不同年份NPP值

Tab. 3 NPP values of different land cover types in different years

年份		防护林/(g C·m⁻²)	草地/(g C·m⁻²)	水体/(g C·m⁻²)	建筑区/(g C·m⁻²)	裸地/(g C·m⁻²)	地区年均值/总值/(g C·m⁻²)
1994	均值	317.11	195.73	150.75	185.65	198.34	218.50
	总值	3.78×10^{7}	1.93×10^{9}	5.81×10^{7}	1.16×10^{7}	1.53×10^{9}	3.56×10^{9}
2000	均值	272.27	186.61	187.09	198.66	167.06	202.07
	总值	6.81×10^{7}	2.00×10^{9}	5.49×10^{7}	2.82×10^{7}	1.12×10^{9}	3.27×10^{9}
2006	均值	214.10	198.76	125.12	204.67	192.68	216.72
	总值	1.15×10^{8}	1.63×10^{9}	3.74×10^{7}	2.77×10^{7}	1.72×10^{9}	3.53×10^{9}
2012	均值	266.13	212.43	191.42	196.88	206.60	235.35
	总值	2.31×10^{8}	1.74×10^{9}	4.32×10^{7}	2.86×10^{7}	1.80×10^{9}	3.83×10^{9}
2018	均值	302.81	241.14	189.98	163.86	216.99	258.42
	总值	2.94×10^{8}	2.17×10^{9}	7.53×10^{7}	2.32×10^{7}	1.65×10^{9}	4.21×10^{9}

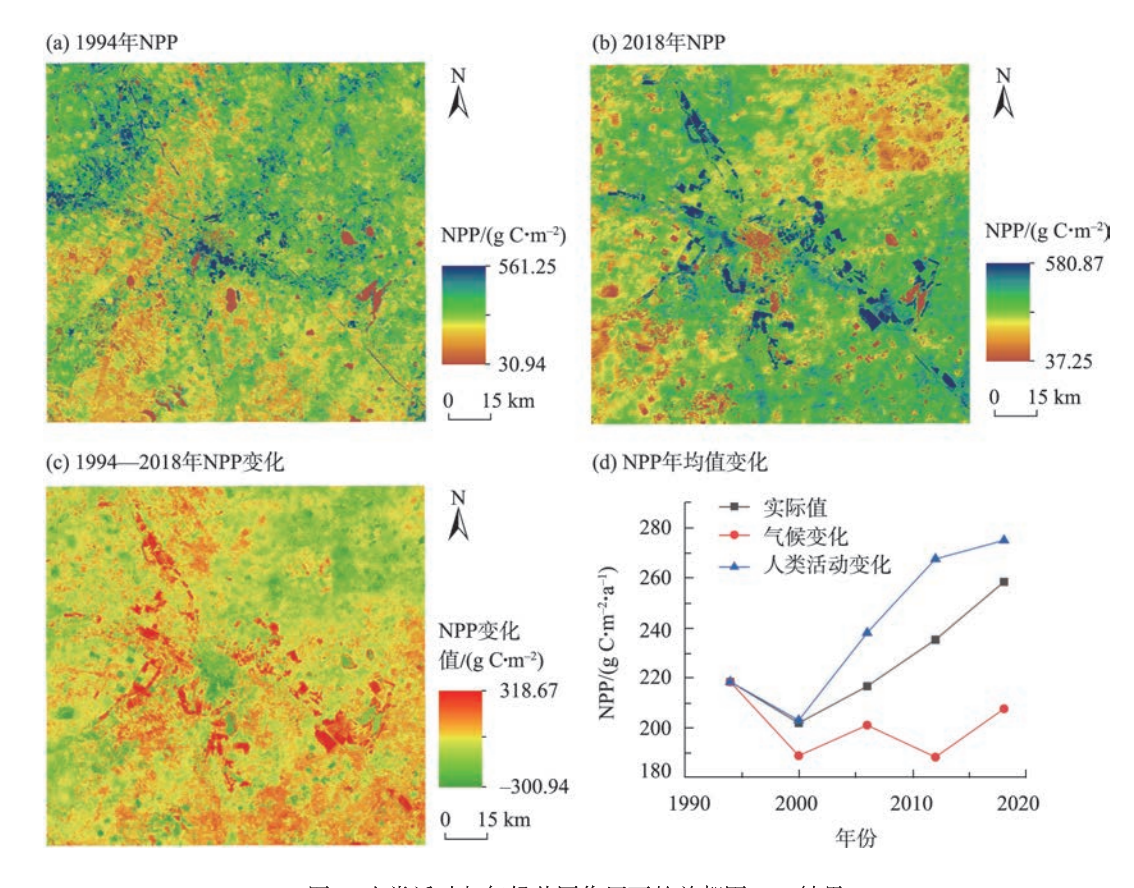


图3 人类活动与气候共同作用下的首都圈NPP结果

Fig. 3 NPP results under the joint action of human activities and climate

体,相应地5种土地覆盖类型占地面积分别从1994年的1.02%、58.47%、37.87%、0.35%、2.29%变化至2018年的5.35%、49.68%、42.00%、0.78%、2.19%。包括农田和草原的其他植被土地覆盖类型占比最大的,占地面积由58.47%下降到49.68%植被NPP平均值介于186.61~541.14 g C·m⁻²之间。首都圈防护林面积显著增加,防护林NPP均值也达到最高,介于214.10~317.11 g C·m⁻²。

由图3d可知,1994—2000年间研究区NPP出现了损失,首都圈人工造林的同时出现NPP均值下降与预期目标不符合。结合植被NPP结果和土地利用覆盖类型,究其原因发现,1994—2000年时段内水体面积急剧减少,仅仅6 a间减少面积达8.24×10^{7} m²。这也正是自1997年哈萨克斯坦迁都到阿斯塔

纳后，城市化建设导致短时间内用水过度，水体的减少直接或间接导致了整个地区NPP的减少。2000年后NPP又逐渐上升，很大程度上依赖于首都圈绿环建设工程的实施，整体提升了NPP变化幅度。

3.2 哈萨克斯坦首都圈NPP的影响因素

综上所述，25 a间首都圈NPP平均值增加了39.92 g C·m^{-2}。3种仿真实验情景下的NPP模拟结果对比如图3d所示，人类活动对NPP有非常明显的增益效果，1994—2018年间研究区内NPP均值增加了56.45 g C·m^{-2}，而气候变化对NPP的影响呈现出很大的波动性，每个年份有增有减，与气候变化尤其是降水变化趋势相吻合(P=0.618)。在人类活动和气候变化共同作用下，哈萨克斯坦首都圈绿环工程的实施，使得造林面积不断增加，对NPP有显著的正增益效果[0.27 Tg C·a^{-1}(P<0.1)]。

3.2.1 人类活动变化对首都圈NPP影响 通过对比图4a、图4b显示，1994—2018年防护林面积增加了4.68%(图4c)，城市建筑区面积增加，大部分是通过扩张裸地转变而来。城区建筑面积所占比例较小(小于1%)，城市扩张对地区NPP的影响极其有限。其他植被面积有较为明显的下降，绿环工程的实施使得大面积的灌木丛/草地转化为森林(图4d)。

防护林面积的增加具有防风固沙的效果，同时能够提高地区陆地生态系统固碳能力以及改善当地生态环境质量。基于情景2，人类活动(土地覆盖类型变化)对首都圈陆地净生产力具有积极的影响(图5)，主要得益于森林面积的增加(图4c)。在该情景下首都圈陆地生态系统年净生产力增加显著(0.38 Tg C·a^{-1}, P<0.1)，NPP总值从3.56 Tg C增加到4.49 Tg C。其中防护林、其他植被、水体、建筑用地、裸地分别贡献了0.26 Tg C、0.33 Tg C、0.02 Tg C、0.01 Tg C、0.31 Tg C。

3.2.2 气候变化对首都圈NPP影响 1994—2018年间首都圈气候呈现较大的波动性，但整体变化趋势不明显(图6)。太阳辐射波动幅度较大且有略微下降(图6b)，为−0.019 W·m^{-2}·a^{-1}；年平均降雨量变化相对平缓，为0.14 mm·m^{-2}·a^{-1}(图6a)；2000年平均气温最高达到了16.9 °C(图6c)，25 a间波动幅度较大，总体上升了0.24 °C·a^{-1}。

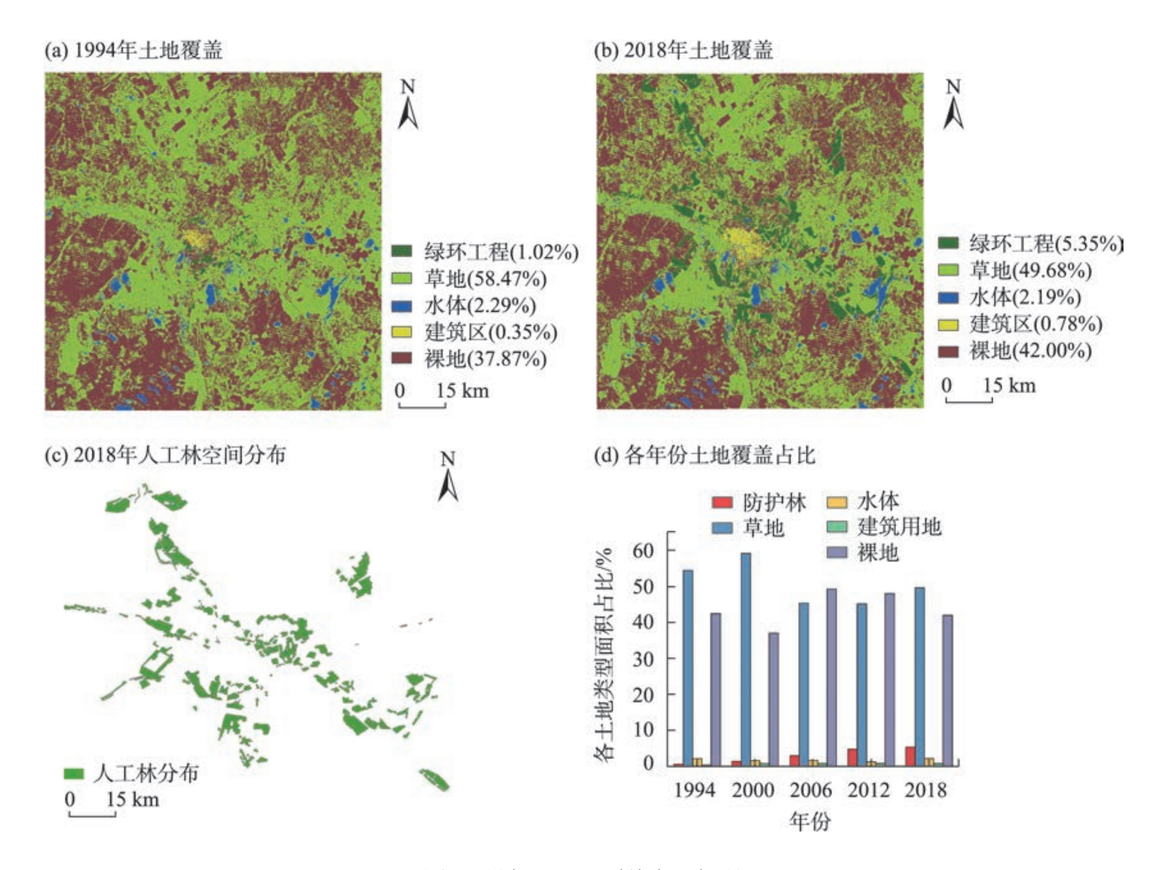


图4 研究区土地覆盖类型概况

Fig. 4 The summary of the land cover types within the research region

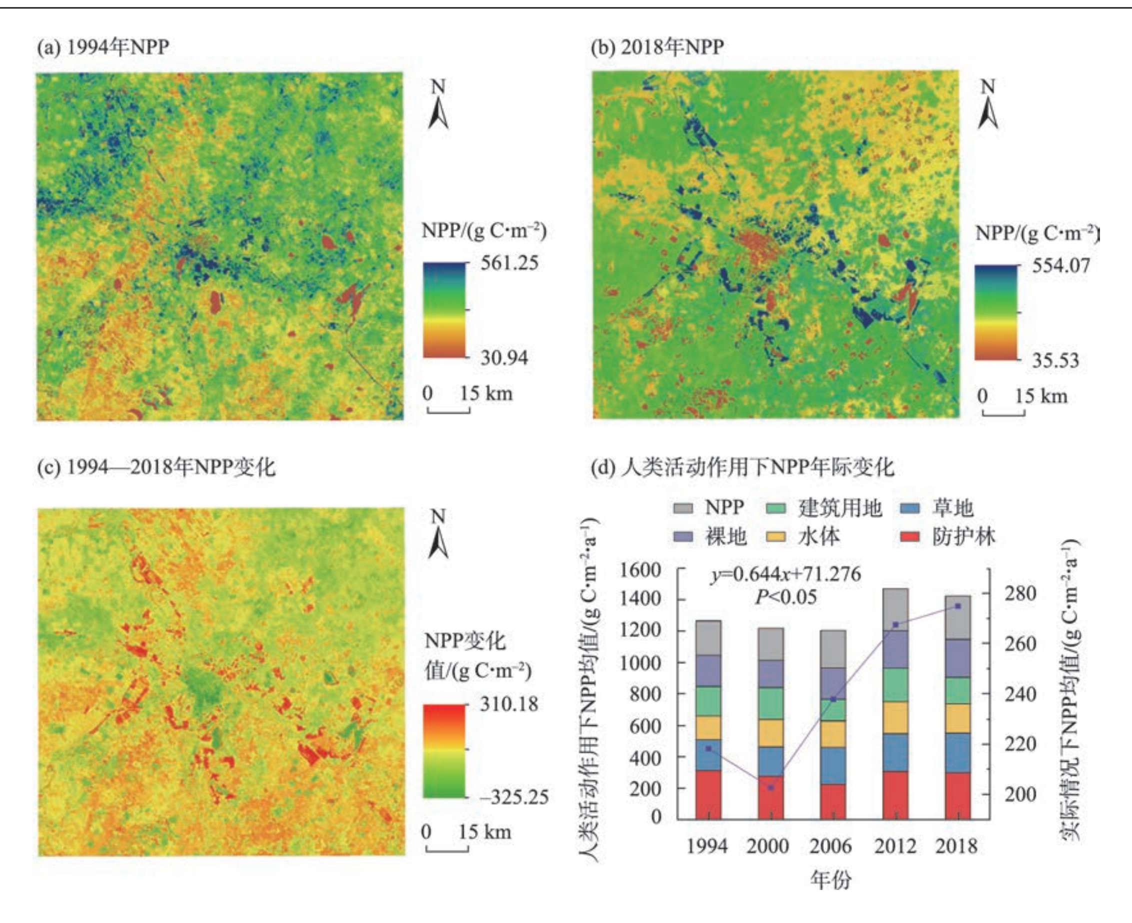


图5　人类活动作用下首都圈NPP变化

Fig. 5　Changes in the metropolitan region's NPP as a result of human activities

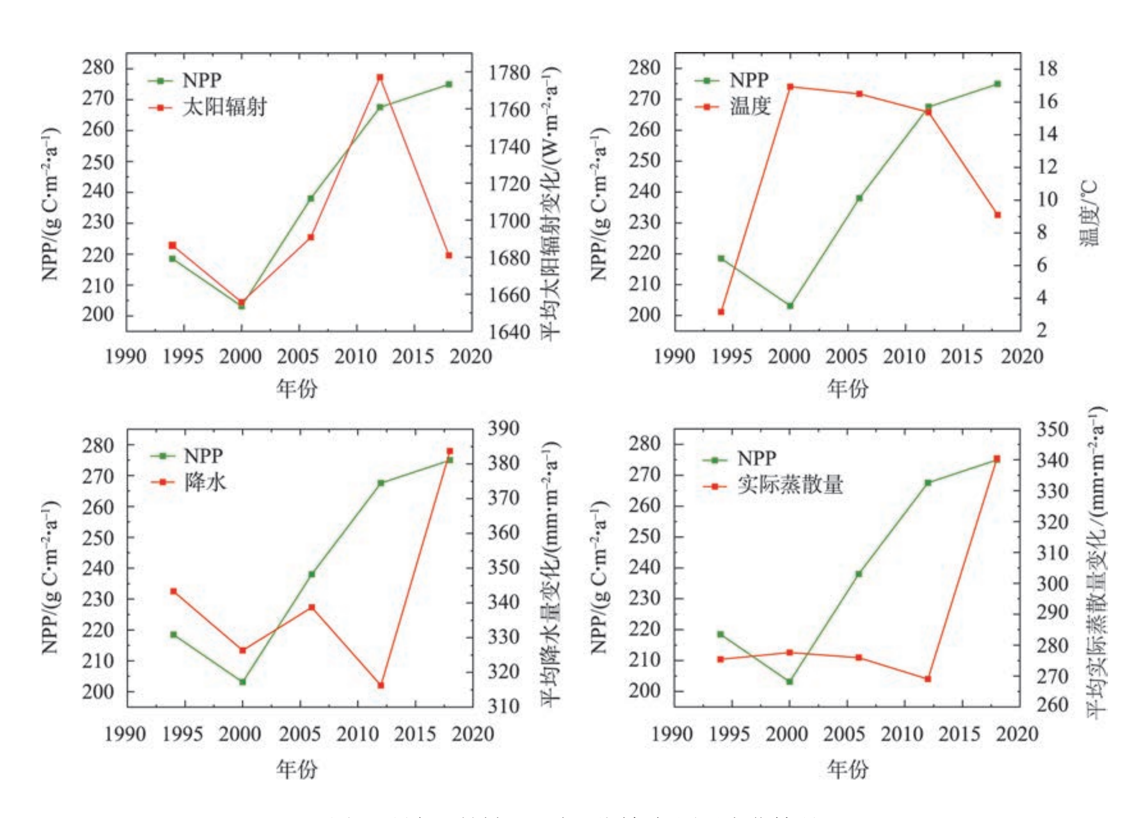


图6　研究区植被NPP与不同气候因子变化情况

Fig. 6　NPP of vegetation and changes of different climatic factors in the study area

气候因子如气温、土壤水分状况以及大气水汽压差等会通过影响植物的光合能力而调节植被的NPP。基于情景3研究发现(图7),气候变化对首都圈NPP影响波动非常大,但整体上气候因素对NPP影响并不明显,NPP均值变化较小(图7c)。研究区西南部和东北部NPP出现较为明显的损失,西北部NPP值有显著增加,大部分均保持较微弱的变化。

在温度胁迫和水分胁迫作用下,低温和高温时高呼吸消耗将降低光能利用率,除此之外环境中植物所能利用的有效水分的增加也会使光能利用率增加。1994—2000年和2006—2012年间温度的升高,尤其是降雨量的减少是地表水分减少的主要因素,直接导致了NPP损失(图7d),NPP均值分别由218.50 g C·m^{-2}·a^{-1}、201.19 g C·m^{-2}·a^{-1}降到了189.00 g C·m^{-2}·a^{-1}、188 g C·m^{-2}·a^{-1}。2000—2006年和2012—2018年期间随着降水条件的改善,该地区NPP均值显著上升,均值分别达到201.19 g C·m^{-2}·a^{-1}、207.73 g C·m^{-2}·a^{-1},气候变化对该地区NPP整体上呈现负增益效果(−0.07 T g C·a^{-1}, P=0.34)。

3.3 影响NPP变化的气候主控因子

为进一步探究不同气候因子对NPP的影响,在该地区影像上随机采取500个点并提取NPP值和降水、温度、太阳辐射、实际蒸散量、潜在蒸散量等数据,利用主成分分析PCA和Pearson相关系数法研究了NPP变化的气候主控因子。

研究结果表明(图8),不同年份不同气候因子的变化对研究区NPP贡献程度不一样,但是温度、太阳辐射、降水均是影响NPP变化最相关的影响因子。图8a~图8e分别代表5个不同时期不同气候因子年均值对NPP变化影响程度,1994—2018年间温度对NPP变化影响最大,2000—2006年间降水对NPP变化影响最大,2012年则是太阳辐射因子对NPP变化影响最大。其中,降水与NPP的Pearson相关系数为正值即正相关,温度、太阳辐射与NPP的Pearson相关系数为负值即负相关(图8f)。由此可知,水分是影响植物光合作用的重要因素,降水量的变化改变了土壤水的含量,在雨水充足且温度适宜的年份该地区NPP显著增加;由于哈萨克斯坦首

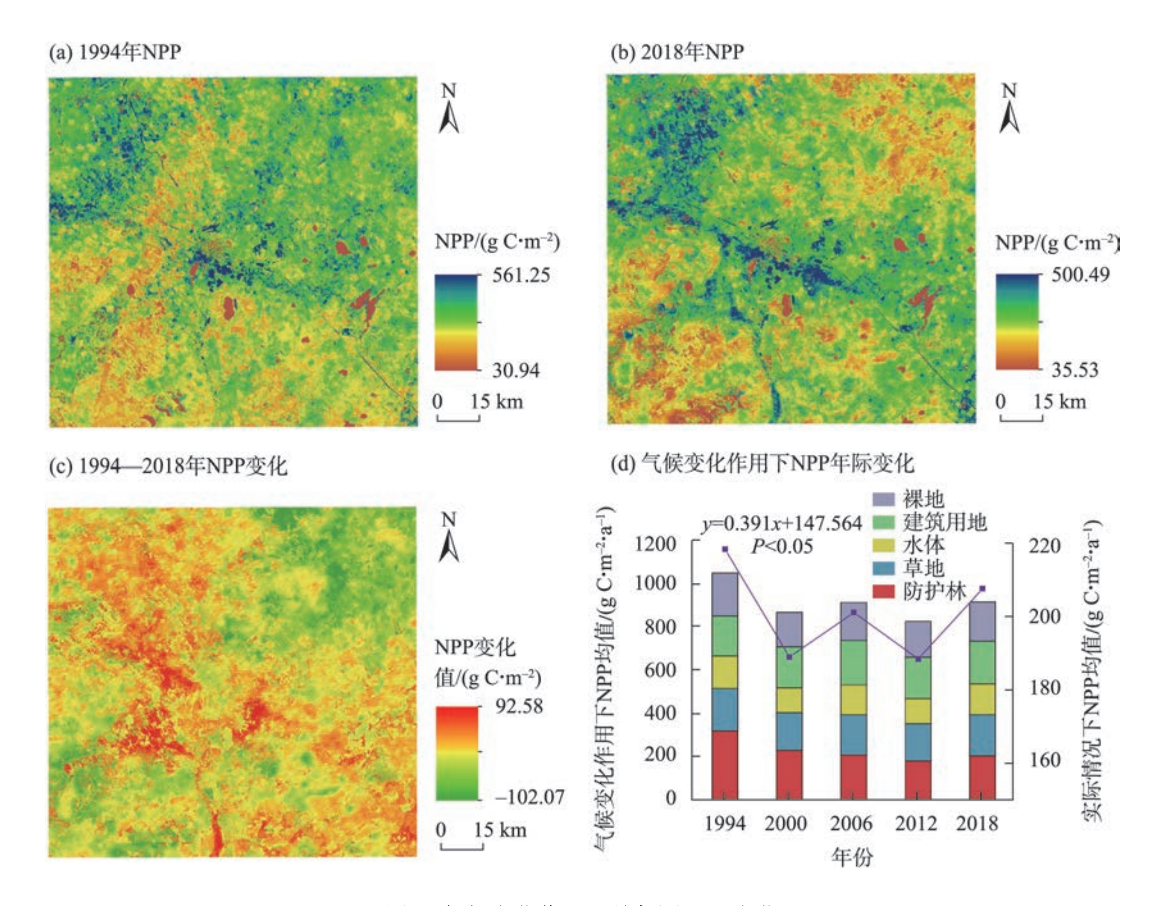
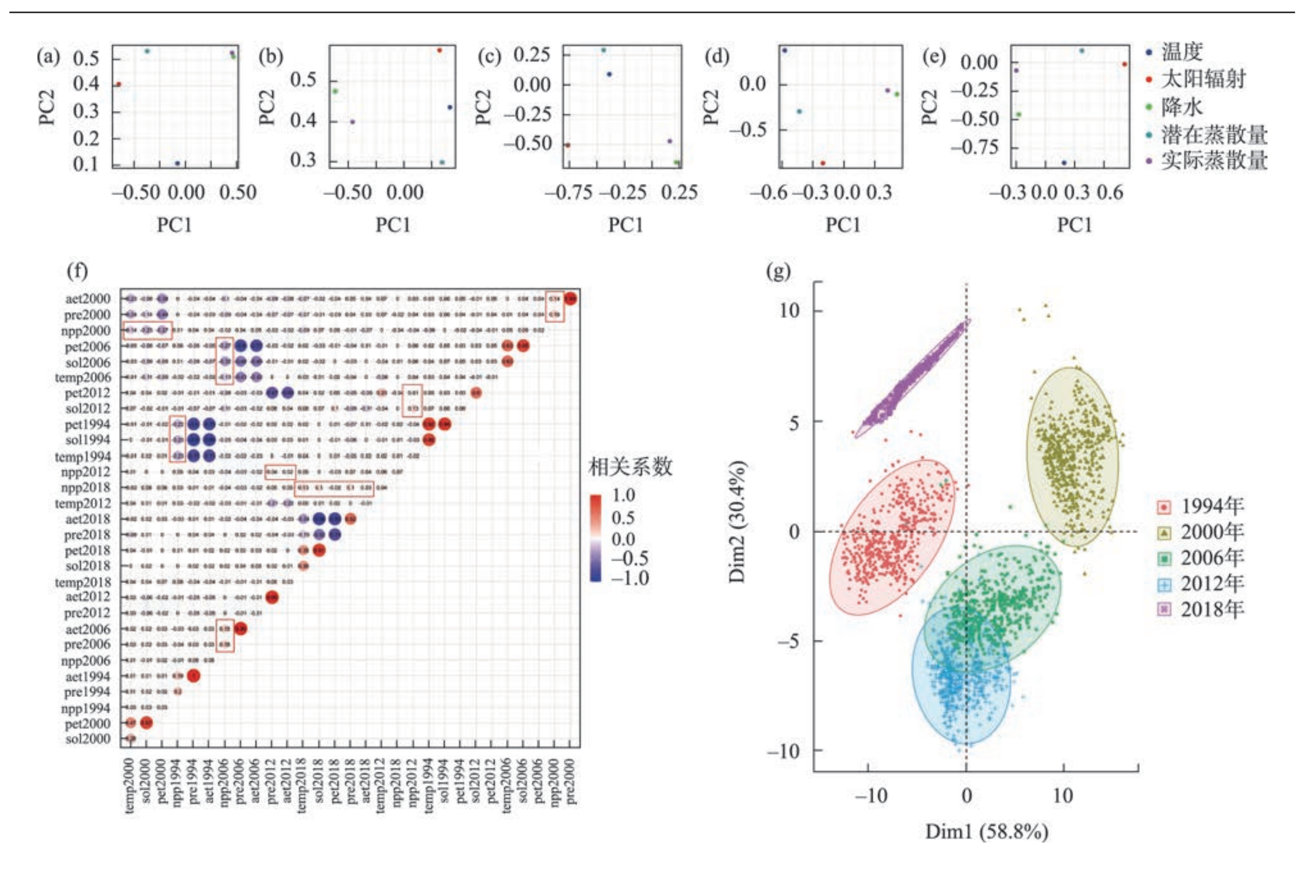


图7 气候变化作用下首都圈NPP变化

Fig. 7 Changes in NPP in the metropolitan region as a result of climate change



注:图f中红框表示NPP和对应年份气候变量的Pearson系数;aet表示实际蒸散量;pre表示降水量;npp表示植被NPP;pet表示潜在蒸散量;sol表示太阳辐射;temp表示平均温度。

图8 不同气候因子主成分分析与Pearson系数计算

Fig. 8 Principal component analysis and determination of the Pearson coefficient for several climatic parameters

都圈位于干旱-半干旱地区,缺水情况下温度升高和太阳辐射的增加导致水分快速流失,从而使植物光合作用等生命活动产生了不利影响。

4 讨论

哈萨克斯坦首都阿斯塔纳位于干旱-半干旱草原区,冬季寒冷,夏季潮热,常年干旱和大风给当地生态稳定性带来严重的威胁,哈萨克斯坦政府为改善阿斯塔纳城市人居环境从1997年实施了首都圈绿环工程。为了更好地探究首都圈植被NPP的时空变化特征以及迁都对其的影响,本研究选取1994年作为迁都前的对照,每隔6 a提取一幅研究区土地利用覆盖图。研究区范围的划定依据为哈萨克斯坦提供的调查监测图[28]。本文在基于CASA模型的基础上,通过设定不同情境,分别计算研究区内植被NPP,探究在人类活动和气象条件变化下对研究区内植被NPP的影响,最后通过Pearson相关系数计算和PCA分析确定研究区内植被NPP变化的驱动因素。

人类活动是中亚地区植被初级生产力动态变化的重要驱动力[29],研究发现从1994—2018年哈萨克斯坦首都圈绿环工程的实施使大面积的草原和其他植被转换为森林,植被NPP整体呈现上升的趋势(图3)。1994—2000年间哈萨克斯坦将首都迁至于此,短时间内人口的增长、建筑面积扩增、用水消耗过度导致地表水分减少,水分减少降低了草原植物的光合作用效率,抑制植物活动和有机质生产,最终降低了植被生产力[30]。随着"绿环工程"的实施和后续地表水逐步恢复,森林覆盖面积不断扩大,研究区内NPP也在不断的增加。另外,在2000年以后,哈萨克斯坦经过相应的政策改革,开始恢复农牧业,使得该地区生产规范化[31],Han等[32-34]研究表明干旱地区合理的放牧能有效防止植被退化,有利于植被生态系统的可持续发展。

半干旱-干旱生态系统中的植被对气候变化极其敏感,降水是影响地区植被NPP的主要因素。黄

钰[35]发现,中国陆地植被NPP变化主要受降水量的主导作用;韩其飞等[36]的研究也表明,干旱地区降水量是影响NPP变化的主要因子;而植被NPP变化是基于多种因素共同影响的结果[37-38]。本文为量化人类活动和气候变化对地区植被NPP产生的影响,模拟了气候条件保持在1994年水平不变的情境下,计算了不同年份植被NPP(图5)。结合图3d可以看出,在人类活动的影响下研究区内植被NPP增长速率最快。其次模拟了土地覆盖和NDVI值保持为1994年的水平不变(图7),可以看出气候变化对研究区内植被NPP影响波动较大,不同年份之间NPP差值差异明显。研究表明:降水、太阳辐射和温度是哈萨克斯坦首都圈植被NPP变化的主要驱动因素,水分是影响植物光合作用的重要因素。降水量的变化改变了土壤水的含量,因此在雨水充足且温度适宜的年份NPP显著增加,水热良好搭配在NPP形成中起到重要的作用[39]。但是由于哈萨克斯坦首都圈处于干旱-半干旱地区,在缺水的情况下,温度升高和太阳辐射增加会导致水分快速流失及植被气孔关闭,同时伴随着潜在蒸散和水分胁迫增强,进而导致草地生产力降低,从而对植物光合作用等生命活动产生不利影响[40]。

5 结 论

本文通过CASA模型模拟了3种不同情境下哈萨克斯坦首都圈植被净生产力的时空变化,定量分析了人类活动和气候变化对该地区NPP的影响,探讨了不同气候因子对NPP的驱动力大小,主要结论如下:

(1) 在1994—2018年间,哈萨克斯坦首都圈植被NPP呈现波动上升趋势,NPP多年平均值为226.21 $g\ C\cdot m^{-2}\cdot a^{-1}$。首都圈5种主要土地覆盖类型NPP均值从高到低分别为:防护林>其他值被>裸地>建筑用地>水体。

(2) 人类活动对首都圈NPP影响有显著增益效果(0.38 $Tg\ C\cdot a^{-1}$, $P<0.01$),气候变化对首都圈NPP整体上呈负增益效果(−0.07 $Tg\ C\cdot a^{-1}$, $P=0.34$)。在人类活动(土地覆盖变化)和气候变化共同作用下,哈萨克斯坦首都圈NPP总体上呈现显著正增益效果(0.27 $Tg\ C\cdot a^{-1}$, $P<0.1$)。相较于气候变化,人类活动对植被净初级生产力影响更加明显,相关性也更强。

(3) 气候因子中降水、温度、太阳辐射和实际蒸散量是影响研究区NPP变化的直接驱动因素,其中降水对研究区NPP有显著的正效应,温度、太阳辐射和实际蒸散量对研究区NPP有显著负效应。

参考文献(References):

[1] 石志华, 刘梦云, 吴健利, 等. 基于CASA模型的陕西省植被净初级生产力时空分析[J]. 水土保持通报, 2016, 36(1): 206-211, 345. [Shi Zhihua, Liu Mengyun, Wu Jianli, et al. Spatial-temporal analysis of vegetation net productivity in Shanxi Province based on CASA model[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2016, 36(1): 206-211, 345.]

[2] 栗忠飞, 王小莲, 徐钰涛, 等. 1996—2015年间滇西北香格里拉植被NPP变化分析[J]. 生态学报, 2022, 42(1): 266-276. [Li Zhongfei, Wang Xiaolian, Xu Yutao, et al. Changes of net productivity of vegetation from 1996 to 2015 in Shangrila region, China [J]. Acta Ecological Sinica, 2022, 42(1): 266-276.]

[3] Bao G, Bao Y H, Qin Z H, et al. Modeling net primary productivity of terrestrial ecosystems in the semi-arid climate of the Mongolian Plateau using LSWI-based CASA ecosystem model[J]. International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation, 2015, 46: 84-93.

[4] Dennis D, Baldocchi, Xu L K, et al. How plant functional-type, weather, seasonal drought, and soil physical properties alter Water and energy fluxes of an Oak-Grass savanna and an annual grassland[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2003, 123(1-2): 13-39.

[5] Haeda N, Cangara A R, Culla A S, et al. Indonesia-norway cooperation in reducing emission from deforestation and degradation framework: A case study of central kalimantan forest[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020, 575: 12155.

[6] Fang P, Yan N N, Wei P P, et al. Aboveground biomass mapping of crops supported by improved CASA model and sentinel-2 multispectral imagery[J]. Remote Sensing, 2021, 13(14): 2755.

[7] 张美玲, 陈全功, 蒋文兰. 不同草地类型净初级生产力(NPP)模拟及其敏感性分析[J]. 干旱区地理, 2021, 44(2): 369-378. [Zhang Meiling, Chen Quangong, Jiang Wenlan. Simulation and sensitivity analysis of net primary productivity (NPP) of different grassland types[J]. Arid Land Geography, 2021, 44(2): 369-378.]

[8] 孙从建, 乔鹏, 王佳瑞, 等. 2000年以来吕梁连片贫困区植被净初级生产力(NPP)时空变化特征分析[J]. 生态学报, 2022, 42(1): 277-286. [Sun Congjian, Qiao Peng, Wang Jiarui, et al. Spatio-temporal variation characteristics of net primary productivity in Lvliang contiguous poverty areas science 2000[J]. Acta Ecologica Sinic, 2022, 42(1): 277-286.]

[9] Christopher B Field, James T Randerson, Carolyn M Malmström. Global net primary production: Combining ecology and remote

sensing[J]. Remote Sensing of Environment, 1995, 51(1): 74-88.

[10] 朱文泉, 陈云浩, 徐丹, 等. 陆地植被净初级生产力计算模型研究进展[J]. 生态学杂志, 2005, 24(3): 296-300. [Zhu Wenquan, Chen Yunhao, Xu Dan, et al. Advances in terrestrial net primary productivity (NPP) estimation models[J]. Chinese Journal of Ecology, 2005, 24(3): 296-300.]

[11] 张雪蕾, 肖伟华, 王义成. 基于改进的CASA模型三峡库区NPP时空特征及气候驱动机制[J]. 生态学报, 2021, 41(9): 3488-3498. [Zhang Xuelei, Xiao Weihua, Wang Yicheng. Temporal-spatial variations of NPP and its climate driving mechanism in the three Gorges Reservoir area based on modified CASA model[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(9): 3488-3498.]

[12] 刘洁, 孟宝平, 葛静. 基于CASA模型和MODIS数据的甘南草地NPP时空动态变化研究[J]. 草业学报, 2019, 28(6): 19-32. [Liu Jie, Meng Baoping, Ge Jing. Spatio-temporal dynamic change of grassland NPP in Gannan prefecture, as determined by the CASA model[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2019, 28(6): 19-32.]

[13] 朱文泉, 潘耀忠, 龙中华. 基于GIS和RS的区域陆地植被NPP估算——以中国内蒙古为例[J]. 遥感学报, 2005, 9(3): 300-307. [Zhu Wenquan, Pan Yaozhong, Long Zhonghua. Estimating net primary productivity of terrestrial vegetation based on GIS and RS: A case study in Inner Mongolia, China[J]. National Remote Sensing Bulletin, 2005, 9(3): 300-307.]

[14] 张鑫彤, 吴秀芹. 基于CASA模型的2005—2019年云南断陷盆地NPP时空变化研究[J]. 地球学报, 2021, 42(3): 426-434. [Zhang Xintong, Wu Xiuqin. Research on the spatial-temporal variation of NPP in Yunnan fault-depression basins based on CASA model in 2005-2019[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2021, 42(3): 426-434.]

[15] 侯丽丽, 银山, 都瓦拉, 等. 基于CASA模型的浑善达克沙地植被NPP模拟及时空分析[J]. 水土保持研究, 2020, 27(2): 165-171. [Hou Lili, Yin Shan, Du Wala, et al. Simulation and spatial-temporal analysis of vegetation in Hunshandak Sandy Land based on CASA model[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2020, 27(2): 165-171.]

[16] 董丹, 倪健. 利用CASA模型模拟西南喀斯特植被净第一性生产力[J]. 生态学报, 2011, 31(7): 1855-1866. [Dong Dan, Ni Jian. Using modeling changes of net primary productivity of karst vegetation in Southwest China using the CASA model[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(7): 1855-1866.]

[17] 耿笛, 梁亮, 黄婷, 等. 利用改进的CASA模型估算城市尺度NPP——以徐州城区为例[J]. 测绘通报, 2021(1): 78-83, 89. [Geng Di, Liang Liang, Huang Ting, et al. Estimation of urban scale NPP by using improved CASA model: Taking Xuzhou City as an example[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2021(1): 78-83, 89.]

[18] 王旭阳, 张显峰, 赵杰鹏. CASA模型及其在新疆准格尔地区的实现[C]//Dcdf数字中国发展高层论坛暨信息主管峰会. 北京: 北京大学, 国际数学地球学会, 2010. [Wang Xuyang, Zhang Xianfeng, Zhao Jiepeng. CASA model and its implementation in Jungar Region, Xinjiang[C]//Dcdf Digital China Development High Level Forum and Information Executives Summit. Beijing: Peking University, International Mathematical Earth Society, 2010.]

[19] 赵守栋, 王京凡, 何新, 等. 城市化对气候变化的影响及其反馈机制研究[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2014, 50(1): 66-72. [Zhao Shoudong, Wang Jingfan, He Xin, et al, Effect of urbanization on climate change and related retroaction mechanisms[J]. Journal of Beijing Normal University (Naturnal Science Edition), 2014, 50(1): 66-72.]

[20] 刘兴中, 何英. 可持续发展视角下第十二师水资源利用研究[J]. 农村经济与科技, 2020, 31(18): 18-20, 23. [Liu Xingzhong, He Ying. Study on water resources utilization of the 12th division from the perspective of sustainable development[J]. Rural Economy and Science-Technology, 2020, 31(18): 18-20, 23.]

[21] 李传华, 曹红娟, 范也平, 等. 基于校正的CASA模型NPP遥感估算及分析——以河西走廊为例[J]. 生态学报, 2019, 39(5): 1616-1626. [Li Chuanhua, Cao Hongjuan, Fan Yeping, et al. Remote sensing estimation and analysis of NPP based on corrected CASA model: A case study of Hexi Corridor[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(5): 1616-1626.]

[22] 张仁平, 郭靖, 张云玲. 新疆草地净初级生产力(NPP)空间分布格局及其对气候变化的响应[J]. 生态学报, 2020, 40(15): 5318-5326. [Zhang Renping, Guo Jing, Zhang Yunling. Spatial distribution pattern of grassland net primary productivity (NPP) and its response to climate change in Xinjiang[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(15): 5318-5326.]

[23] 沃笑, 吴良才, 张继平, 等. 基于CASA模型的三江源地区植被净初级生产力遥感估算研究[J]. 干旱区资源与环境, 2014, 28(9): 45-50. [Wo Xiao, Wu Liangcai, Zhang Jiping, et al. Estimation of net primary productivity of vegetation in Three-River headwater refion using CASA model[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2014, 28(9): 45-50.]

[24] 朱文泉, 潘耀忠, 张锦水. 中国陆地植被净初级生产力遥感估算[J]. 植物生态学报, 2007, 31(3): 413-424. [Zhu Wenquan, Pan Yaozhong, Zhang Jinshui. Estimation of net primary productivity of Chinese terrestrial vegetation based on remote sensing[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2007, 31(3): 413-424.]

[25] 周伟, 牟凤云, 刚成诚, 等. 1982—2010年中国草地净初级生产力时空动态及其与气候因子的关系[J]. 生态学报, 2017, 37(13): 4335-4345. [Zhou Wei, Mou Fengyun, Gang Chengcheng, et al. Spatial-temporal dynamics of grassland net primary productivity and their relationship with climatic factors from 1982 to 2010 in China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(13): 4335-4345.]

[26] 裘骏一. 基于CASA模型的中卫沙坡头自然保护区NPP时空变化研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2016. [Qiu Junyi. The Temporal-Spatial Variation of NPP in Zhongwei-Shapotou Nature Reserve Based on CASA Model[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2016.]

[27] Zhang Y L, Song C H, Zhang K R, et al. Effects of land use/land cover and climate changes on terrestrial net primary productivity in the Yangtze River basin, China, from 2001 to 2010[J]. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2014, 119(6): 1092–1109.

[28] 艾柯代·艾斯凯尔. 哈萨克斯坦首都圈绿环工程主要生态服务功能评估[D]. 乌鲁木齐: 中国科学院新疆生态与地理研究所, 2021. [Akida Askar. Evaluation of Key Ecological Services of Green Belt Project in Kazakhstan Capital Circle[D]. Urumqi: Xinjiang Institute of Ecology and Geography Chinese Academy of Sciences, 2021.]

[29] Chen Y Z, Ju W M, Groisman P Y, et al. Quantitative assessment of carbon sequestration reduction induced by disturbances in temperate eurasian steppe[J]. Environmental Research Letters, 2017, 12(11): 115005.

[30] Gourdji S M, Sibley A M, Lobell D B. Global crop exposure to critical high temperatures in the reproductive period: Historical trends and future projections[J]. Environmental Research Letters, 2013, 8 (2): 024041.

[31] Kraemer R, Prishchepov A V, Müller D, et al. Long-term agricultural land-cover change and potential for cropland expansion in the former virgin lands area of Kazakhstan[J]. Econstor Open Access Articles, 2015, 10(5): 054012.

[32] Han Q F, Luo G P, Li C F, et al. Simulated grazing effects on carbon emission in Central Asia[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2016, 216: 203–214

[33] Lioubimtseva E. Climate change in arid environments: revisiting the past to understand the future[J]. Progress in Physical Geography, 2004, 28(4): 502–530.

[34] 张云新, 郝海超, 范连连, 等. 中亚草原NPP时空动态及驱动因素研究[J]. 干旱区研究, 2022, 39(3): 698–707. [Zhang Yunxin, Hao Haichao, Fan Lianlian, et al. Study on spatio-temporal dynamics and driving factors of NPP in Central Asian grassland[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(3): 698–707.]

[35] 黄玨. 中国陆地植被 NPP 对气候变化响应及其敏感性分析[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2011. [Huang Yu. Response of Vegetation Net Primary Productivity (NPP) to Climate Change in China and Sensitivity Experiments[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2011.]

[36] 韩其飞, 陆研, 李超凡. 气候变化对中亚草地生态系统碳循环的影响研究[J]. 干旱区地理, 2018, 41(6): 1351–1357. [Han Qifei, Lu Yan, Li Chaofan. Impact of climate change on grassland carbon cycling in Central Asia[J]. Arid Land Geography 2018, 41(6): 1351–1357.]

[37] 左丽媛, 高江波. 基于地理探测器的喀斯特植被NPP定量归因[J]. 生态环境学报, 2020, 29(4): 686–694. [Zuo Liyuan, Gao Jiangbo. Quantitative attribution analysis of NPP in Karst Peak Cluster depression based on geographical detector[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2020, 29(4): 686–694.]

[38] 杨丹, 王晓峰. 黄土高原气候和人类活动对植被NPP变化的影响[J]. 干旱区研究, 2022, 39(2): 584–593. [Yang Dan, Wang Xiaofeng. Contribution of climatic change and human activities to changes in net primary productivity in the Loess Plateau[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(2): 584–593.]

[39] 王莺, 夏文韬, 梁天刚, 等. 基于MODIS植被指数的甘南草地净初级生产力时空变化研究[J]. 草业学报, 2010, 19(1): 201–210. [Wang Ying, Xia Wentao, Liang Tiangang. Spatial and temporal dynamic changes of net Primary product based on MODIS vegetation index in Gannan grassland[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2010, 19(1): 201–210.]

[40] 刘婵, 刘冰, 赵文智, 等. 中亚地区植被净初级生产力时空动态及其与气候因子关系[J]. 遥感技术与应用, 2020, 35(4): 924–933. [Liu Chan, Liu Bing, Zhao Wenzhi, et al. Temporal-spatial variation of net primary productivity of vegetation and its relationship with climatic in Central Asia[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2020, 35(4): 924–933.]

Characteristics and drivers of the spatial-temporal change of net primary productivity in the capital area of Kazakhstan from 1994 to 2018

CHEN Yusen[1,2,3], Akida ASKARL[1,2,3], WANG Yongdong[1,2,3], Talgat ABZHANOV[4], Dani SARSEKOVA[4], Zhazira ZHUMABEKOVA[4]

(1. Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, Xinjiang, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. National Desert Technology Research Center for Desert-Oasis Ecological Construction, Urumqi 830011, Xinjiang, China; 4. Saken Seifullin Kazakh Agrotechnical University, Astana 010000, Kazakhstan)

Abstract: Clarifying the impacts of climate change and human activity on plant's net primary productivity (NPP) is crucial for regional ecosystem transformation and sustainable development. Using a simulated scenario experimental design based on the CASA model, five periods of Landsat remote sensing images, and meteorological data spanning the years 1994 to 2018, this paper determines the effects of two factors, human activities and climate change, on plant's NPP in the capital area. The results indicate that: (1) During 1994–2018, the multi-year average of NPP in the studied area was 226.21 g C·m^{-2}·a^{-1}, with a fluctuating rising trend; (2) The execution of the Green Ring Project led to a large positive gain in NPP owing to an increased plantation area (0.38 Tg C·a^{-1}, $P < 0.01$).In contrast, the impact of climate change on NPP is more variable, with an overall loss effect (−0.07 Tg C·a^{-1}, $P = 0.34$). Under the combined influence of human activity (land use change) and climate change, the NPP of Kazakhstan's capital area exhibited a considerable positive gain effect (0.27 Tg C·a^{-1}, $P <$ 0.1); climate change has a lesser impact on plants' net primary productivity than human activities. (3) Temperature, solar radiation, and precipitation are the most influential climatic elements on NPP. During 1994–2000 and 2006–2012, increased temperature and reduced precipitation caused NPP loss, which dropped from 218.50 g C·m^{-2}·a^{-1}, 201.19 g C·m^{-2}· a^{-1} to 189.00 g C·m^{-2}·a^{-1}, 188.48 g C·m^{-2}·a^{-1}; With the improvement of precipitation circumstances over 2000–2006 and 2012–2018, the mean value of NPP in this area increased significantly, reaching 201.19 g C·m^{-2}·a^{-1}, 207.73 g C·m^{-2}·a^{-1} correspondingly. These research findings assist in elucidating the processes of climate change and human activities on NPP and may also serve as a guide to enhance the ecological quality of the desert-steppe area, alleviate the global warming issues, and serve the carbon neutrality goal of Kazakhstan by 2060.

Keywords: CASA model; NPP; Kazakhstan capital circle; PCA; simulation experiment design